

В. И. ПОЛЯНСКИЙ**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ И УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ**

Определены условия уменьшения температуры резания и повышения производительности обработки. Показана эффективность применения многопроходного шлифования и высокоскоростного резания при фрезеровании и точении. Установлено, что основным условием повышения производительности обработки при высокоскоростном резании является уменьшение условного напряжения резания до значения, при котором максимальная температура резания становится меньше температуры плавления обрабатываемого материала и появляется возможность асимптотического приближения температуры резания к ее максимальному значению.

Ключевые слова: тепловой процесс, шлифование, фрезерование, точение, высокоскоростное резание, температура резания, производительность обработки, условное напряжение резания, качество обработки.

В. І. ПОЛЯНСЬКИЙ**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕСУ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ТА УМОВИ ЗМЕНШЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ Й ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ**

Визначено умови зменшення температури різання та підвищення продуктивності обробки. Показана ефективність застосування багатоходового шліфування й високошвидкісного різання при фрезеруванні та точінні. Встановлено, що основною умовою підвищення продуктивності обробки при високошвидкісному різанні є зменшення умовного напруження різання до значення, при якому максимальна температура різання стає менше температури плавлення оброблюваного матеріалу і з'являється можливість асимптотичного наближення температури різання до її максимального значення.

Ключові слова: тепловий процес, шліфування, фрезерування, точіння, високошвидкісне різання, температура різання, продуктивність обробки, умовне напруження різання, якість обробки.

V. I. POLYANSKIY**A MATHEMATICAL MODEL OF THE HEAT PROCESS DURING MACHINING AND THE CONDITIONS FOR REDUCING THE TEMPERATURE OF CUTTING AND IMPROVING PROCESSING PERFORMANCE**

This paper proposes a mathematical model of the heat process during grinding and blade processing, which allows to determine the basic conditions for reducing the temperature of cutting and improving processing performance. The effectiveness of multi-pass grinding and high-speed cutting during milling and turning, which are based on the implementation of small slice thickness and increased speed of the part, is shown. It is established that the main condition for a significant increase in processing performance during high-speed cutting is to reduce the conventional cutting voltage to a value at which the maximum cutting temperature becomes less than the melting temperature of the material being processed and it becomes possible to asymptotically approximate the cutting temperature to its maximum value. In this regard, the physical effect of high-speed cutting is due to the fact that the main amount of heat generated during cutting goes into the formed chips, and a small amount of heat goes into the surface layer of the workpiece. This reduces the likelihood of przhog, microcracks and other temperature defects on the treated surface, improves the quality and productivity of processing.

Keywords: heat process, grinding, milling, turning, high-speed cutting, cutting temperature, machining performance, conventional cutting stress, machining quality.

Введение. В настоящее время предприятия Украины оснащаются современным технологическим оборудованием с широкими возможностями повышения качества, точности и производительности механической обработки. Это открывает новые перспективы изготовления высокоточных деталей машин и создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Основными условиями повышения качества обработки, как известно, является снижение тепловой напряженности механической обработки и исключение образования на обрабатываемых поверхностях температурных дефектов при одновременном увеличении производительности. Наиболее неблагоприятными в этом отношении являются процессы шлифования, характеризующиеся повышенной энергоемкостью, что приводит к увеличению температуры резания и снижению качества и производительности обработки. Процессы лезвийной обработки характеризуются меньшей энергоемкостью, что позволяет повысить качество и производительность обработки, особенно за счет применения высокоскоростного резания. Поэтому актуально решение задачи определения

технологических возможностей абразивной и лезвийной обработок на основе разработки математической модели теплового процесса при механической обработке и установления условий уменьшения температуры резания и повышения производительности обработки. Исследования выполнены в соответствии с тематическим планом научно-практических работ ООО «Империя металлов» (г. Харьков).

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованию теплового процесса при механической обработке и его математическому описанию посвящены работы [1-3]. В них приведены теоретические решения по обоснованию условий уменьшения температуры резания и повышения производительности обработки. Однако отсутствуют решения, позволяющие с единых позиций определить температуру резания при шлифовании с учетом тепловых процессов, происходящих не только в поверхностном слое обработанной детали, но и в слое снимаемого припуска. Профессором Якимовым А. В. [3] предложено решение данной задачи, однако оно требует численных расчетов, что ограничивает

обобщенное представление о тепловом процессе при шлифовании и требует дальнейших исследований. Поэтому в работе поставлена задача развития этого подхода и установления на его основе аналитических зависимостей для определения параметров теплового процесса при шлифовании и лезвийной обработке.

Цель работы – уменьшение температуры резания и повышение качества и производительности механической обработки на основе разработки математической модели теплового процесса при шлифовании и лезвийной обработке.

Изложение основного материала. В работе [4] получена аналитическая зависимость для определения

глубины $l_2 = \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau}$ проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при плоском шлифовании (рис. 1), где $a = \lambda / (c \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град); c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; τ – время контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, с.

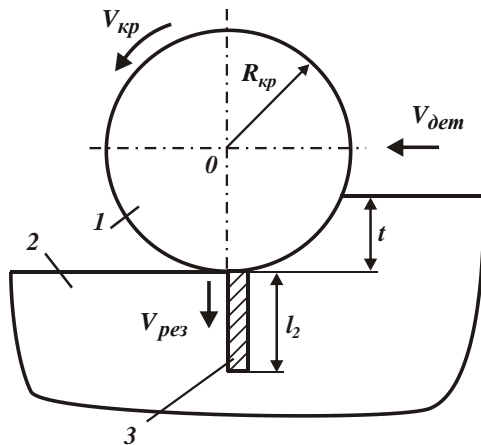


Рис. 1 – Расчетная схема параметров процесса плоского шлифовании: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – адиабатический стержень

Как видно из приведенной зависимости, уменьшить параметр l_2 и, соответственно, интенсивность теплового воздействия на обрабатываемую поверхность можно исключительно за счет уменьшения времени τ , например, путем увеличения скорости детали $V_{дет}$ (рис. 1).

Профессор Якимов А. В. [3] предложил учитывать перерезание шлифовальным кругом адиабатических стержней, которыми условно представлен снимаемый припуск (рис. 1). В этом случае тепловой источник движется со скоростью $V_{рез} = t / \tau$ вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали, где t – глубина шлифовании, м.

В работе [4] математически описан процесс формирования параметра l_2 (длины нагретой части

адиабатического стержня с учетом его перерезания), рассматривая время перемещения теплового источника вдоль адиабатического стержня в виде $\tau = n \cdot d\tau$:

$$l_{2n-1} - V_{рез} \cdot d\tau = l_{2n}, \quad (1)$$

где $l_{2n-1} = \sqrt{2 \cdot a \cdot (\tau_{n-1} + d\tau)}$; $l_{2n} = \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau_n}$ – соответственно, длины нагретого участка адиабатического стержня за время нагрева τ_{n-1} и τ_n , м;

n – условно принятое количество разбиений времени τ на элементарные $d\tau$ -интервалы.

Представляя уравнение (1) в виде:

$$\sqrt{2 \cdot a \cdot (\tau_{n-1} + d\tau)} - \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau_n} = V_{рез} \cdot d\tau, \quad (2)$$

умножая его левую часть на сопряженную величину $\sqrt{2 \cdot a \cdot (\tau_{n-1} + d\tau)} + \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau_n}$ с учетом $\tau_n - \tau_{n-1} = d\tau_n$

и $\sqrt{2 \cdot a \cdot (\tau_{n-1} + d\tau)} \approx \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau_n}$ после преобразований имеем:

$$d\tau = \frac{d\tau_n}{\left(1 - \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_n}{a}} \cdot V_{рез}\right)}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) для начального условия $\tau_n(\tau=0)=0$ принимает вид [4]:

$$\sqrt{\tau_n} = \sqrt{\frac{a}{2}} \cdot \frac{1}{V_{рез}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{V_{рез}^2 \cdot \tau}{a} - \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_n}{a}} \cdot V_{рез}}\right) \quad (4)$$

или

$$l_{2n} = \frac{a}{V_{рез}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{V_{рез}^2 \cdot \tau}{a} - \frac{l_{2n}}{a} \cdot V_{рез}}\right). \quad (5)$$

Расчетами установлено, что время нагрева адиабатического стержня τ_n с увеличением времени τ непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к установившемуся значению, при

котором выполняется условие $e^{-\frac{V_{рез}^2 \cdot \tau}{a} - \sqrt{\frac{2 \cdot \tau_n}{a}} \cdot V_{рез}} \rightarrow 0$, исходя из уравнения (4). Тогда установившееся значение $\tau_n = a / (2 \cdot V_{рез}^2)$. Из этого вытекает, что

всегда выполняется условие $\tau_n < \tau$. Следовательно, существует время теплового насыщения обрабатываемого материала, зависящее от скорости перемещения теплового источника $V_{рез}$ (рис. 1). Чем больше скорость $V_{рез}$, тем меньше время нагрева адиабатического стержня τ_n и соответственно

параметра l_{2n} , который изменяется по такому же закону, как и τ_n с увеличением времени τ . Установившееся максимальное значение равно $l_{2n} = a/V_{рез}$, т.е. чем больше скорость $V_{рез}$, тем меньше параметр l_{2n} .

Из этого можно заключить, что с увеличением скорости $V_{рез}$ основная часть образующегося при резании тепла будет уходить в образующуюся стружку, и лишь небольшая часть – в поверхностный слой обрабатываемой детали. Поэтому с точки зрения снижения вероятности образования температурных дефектов на обрабатываемой поверхности скорость $V_{рез}$ необходимо увеличивать, применяя для этого высокоскоростные методы механической обработки.

Температура резания $\theta = q \cdot l_{2n} / \lambda$ с учетом соотношений $q = \sigma \cdot V_{рез}$ и $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ определяется из уравнения [4]:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \left(1 - e^{-\frac{V_{рез}^2 \cdot \tau}{a} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}}} \right), \quad (6)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

σ – условное напряжение резания (энергоемкость обработки), Н/м²;

θ_{max} – максимальная температура резания, °С.

Следовательно, с увеличением времени τ температура резания θ непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимальному значению $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$.

Таблица 1/ Расчетные значения параметров теплового процесса при шлифовании

θ/θ_{max}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta/\theta_{max}}$	1	1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	2,4596	2,7183
$(1-\theta/\theta_{max}) \cdot e^{\theta/\theta_{max}}$	1	0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$V_{рез}^2 \cdot \tau / a$	0	0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	∞

С целью достижения заданной температуры резания θ и обеспечения максимально возможной производительности обработки, исходя из уравнения (7), глубину шлифования t следует уменьшать, а скорость детали $V_{дет}$ увеличивать, т.е. использовать схему многопроходного шлифования. Как видно, скорость круга $V_{кр}$ явно не входит в уравнение (7), однако влияет на температуру резания посредством изменения условного напряжения резания σ : уменьшая или увеличивая его в зависимости от условий обработки.

Такая же закономерность изменения температуры резания имеет место и при фрезеровании. Так, при торцовом фрезеровании длина контакта фрезы с

Принимая $V_{рез} = t/\tau$ и $\tau = l/V_{дет}$, уравнение (6) окончательно выражается:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{t \cdot Q_{уд}}{a \cdot l}}, \quad (7)$$

где $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ – удельная производительность обработки, м²/с;

l – длина контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м.

В табл. 1 приведены расчетные значения

соотношения $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}}$ в зависимости от температуры резания θ . Как видно, это выражение уменьшается с увеличением температуры резания θ .

Следовательно, уменьшить температуру резания θ можно увеличением правой части уравнения (7), т.е.

увеличением функции $e^{-\frac{t \cdot Q_{уд}}{a \cdot l}}$, что достигается уменьшением глубины шлифования t , удельной производительности обработки $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ и увеличением длины контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью l . В связи с этим, целесообразно использовать шлифование торцом круга, при котором параметр l больше, чем при шлифовании периферией круга, а температура резания θ , наоборот, меньше.

обрабатываемой деталью больше, чем при фрезеровании цилиндрической фрезой. Следовательно, больше правая часть уравнения (7) и меньше температура резания, согласно данным, приведенным в табл. 1.

С уменьшением параметров t и $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ температура резания также уменьшается. Исходя из этого, увеличить производительность обработки для заданной температуры резания θ можно, как и при шлифовании, за счет уменьшения глубины шлифования t и увеличения скорости детали $V_{дет}$ (или подачи). Однако при фрезеровании условное напряжение резания σ меньше, чем при шлифовании. Поэтому меньше θ_{max} и температура резания θ . Появляется также возможность увеличения удельной

производительности обработки $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ за счет увеличения $V_{дет}$, особенно при торцовом фрезеровании, где больше параметр l .

Периодическая прерывистость процесса фрезерования также способствует уменьшению температуры резания θ вследствие частичного охлаждения обрабатываемой поверхности за период прерывания процесса. В этом случае имеющий место эффект снижения температуры резания θ примерно такой же, как и при шлифовании прерывистым кругом. Хотя в работе [3] показано, что при шлифовании прерывистым кругом происходит еще и самозатачивание круга, т.е. восстановление его режущей способности, а это приводит к уменьшению условного напряжения резания σ и дополнительному уменьшению температуры резания θ . Следовательно, при шлифовании прерывистым кругом снижение температуры резания θ происходит по двум каналам [3]: путем уменьшения времени контакта круга с обрабатываемой деталью τ и условного напряжения резания σ , что, согласно уравнению (7), способствует уменьшению θ .

Важным фактором уменьшения температуры резания θ и глубины $l_{2n} = \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau_n}$ проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при фрезеровании следует рассматривать применение высокоскоростного фрезерования. В этом случае происходит уменьшение σ и интенсивности отвода тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, т.е. образующееся при резании тепло в основном уносится образующимися стружками [5]. Это позволяет увеличить производительность обработки за счет увеличения скорости детали $V_{дет}$ (или подачи) и уменьшения глубины резания – как это следует из (7).

Необходимо отметить, что уменьшение условного напряжения резания σ обеспечивает уменьшение максимальной температуры резания θ_{max} . Поэтому даже многократное увеличение $V_{дет}$ и $Q_{уд} = V_{дет} \cdot t$ будет лишь усиливать выполнение условий $e^{-\frac{t \cdot Q_{уд}}{a \cdot l}} \rightarrow 0$ и $\theta \rightarrow \theta_{max}$, согласно уравнения (7), что не повлияет на повышение температуры резания θ , поскольку θ_{max} принимает вполне приемлемые, относительно небольшие значения вследствие уменьшения σ при высокоскоростном фрезеровании. В этом состоит эффект высокоскоростного фрезерования.

Уравнение (7) справедливо и при точении, рассматривая вместо τ толщину среза $a_{срез}$:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{-\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{a_{срез} \cdot Q_{уд}}{a \cdot l}} \quad (8)$$

где $Q_{уд} = V \cdot a_{срез}$ – удельная производительность обработки, м²/с;

V – скорость резания, м/с.

Уменьшить температуру резания θ , исходя из уравнения (8), можно уменьшением параметров $a_{срез}$ и $Q_{уд} = V \cdot a_{срез}$. С целью повышения производительности обработки для заданной температуры резания θ толщину среза $a_{срез}$ необходимо уменьшать, а скорость резания V увеличивать, осуществляя высокоскоростное резание. В этом случае условное напряжение резания σ также будет уменьшаться, что позволит уменьшить θ_{max} до приемлемого уровня (с точки зрения обеспечения высококачественной обработки). Поэтому, даже достаточно значительное увеличение скорости резания V и производительности обработки $Q_{уд} = V \cdot a_{срез}$ будет лишь усиливать выполнение условий

$e^{-\frac{a_{срез} \cdot Q_{уд}}{a \cdot l}} \rightarrow 0$ и $\theta \rightarrow \theta_{max}$, согласно уравнения (8), обеспечивая достижение требуемого значения температуры резания θ . Из этого вытекает, что применение высокоскоростного резания является важным фактором снижения интенсивности теплового воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали и повышения качества и производительности обработки. Образующееся при резании тепло в основном уходит в образующиеся стружки, а в поверхностный слой обрабатываемой детали уходит незначительная часть тепла. Параметр $l_{2n} = \sqrt{2 \cdot a \cdot \tau_n}$ в этом случае за счет уменьшения времени τ_n уменьшается и позволяет исключить образование температурных дефектов на обрабатываемой поверхности.

Исходя из рис. 2, высокоскоростное резание реализует верхнюю часть графика $\theta - \tau$, характеризующуюся асимптотическим приближением температуры резания θ к максимальному значению температуры θ_{max} . Это позволяет фактически неограниченно увеличивать скорость резания V , обеспечивая выполнение условия $\theta \rightarrow \theta_{max}$ и тем самым многократно увеличивая производительность обработки. Однако для выполнения данного условия необходимо, чтобы условное напряжение резания σ уменьшилось до значения, при котором максимальная температура резания $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ принимало бы значение, меньше критического (исключающего образование прижогов, микротрещин и других температурных дефектов) для данного обрабатываемого материала, т.е. меньше температуры его плавления $\theta_{пл}$.

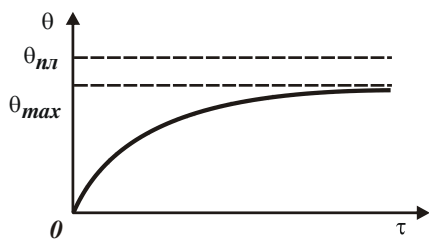


Рис. 2 – Зависимость температуры шлифования θ от времени обработки τ

Если θ_{max} больше температуры плавления обрабатываемого материала $\theta_{пл}$, то выполнить данное условие и реализовать высокоскоростное резание невозможно, поскольку в этом случае, исходя из рис. 2, с увеличением скорости резания V температура резания θ будет непрерывно увеличиваться (для начального участка графика $\theta-\tau$). Однако для осуществления высокоскоростного резания необходимо выполнить условие $\theta_{max} < \theta_{пл}$, что позволит реализовать условие $\theta \rightarrow \theta_{max}$ и фактически неограниченно увеличивать входящие в правую часть уравнения (8) параметры $a_{срез}$ и $Q_{уд}$. Поэтому для анализа закономерностей высокоскоростного резания необходимо знать значение $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$, определяемое из условия $\sigma = P_z / (\epsilon \cdot a_{срез})$, где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; ϵ – ширина среза, м.

Очевидно, σ тем меньше, чем больше $a_{срез}$ из-за увеличения угла сдвига материала β , определяемого по формуле профессора Зворыкина К. А. [6]:

$$\beta = 45^\circ + \frac{(\gamma - \psi)}{2}, \quad (9)$$

где γ – положительный передний угол инструмента; ψ – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента.

Как видно, угол β тем больше, чем больше угол γ и меньше угол ψ . Уменьшить угол ψ можно уменьшением коэффициента трения $f = \tan \psi$ обрабатываемого и инструментального материалов, применяя в качестве инструментального материала алмаз и другие синтетические сверхтвердые материалы, характеризующиеся наименьшим коэффициентом трения, а также нанося на рабочие поверхности инструмента износостойкие покрытия с низким коэффициентом трения. Реализация на практике этих условий уменьшения θ_{max} до значения, меньшего температуры плавления обрабатываемого материала $\theta_{пл}$, открывает новые возможности интенсификации процесса высокоскоростного резания.

Выводы. В работе предложена математическая модель теплового процесса при шлифовании и лезвийной обработке, позволяющая определить основные условия уменьшения температуры резания и повышения производительности обработки. Показана эффективность применения многопроходного шлифования и высокоскоростного резания при фрезеровании и точении, которые основаны на реализации небольших толщин среза и увеличенной скорости детали. Установлено, что основным условием существенного повышения производительности обработки при высокоскоростном резании является уменьшение условного напряжения резания до значения, при котором максимальная температура резания меньше температуры плавления обрабатываемого материала и появляется возможность осуществления асимптотического приближения температуры резания к ее максимальному значению. При этом основное количество тепла, образующегося при резании, уходит в образующиеся стружки, а в поверхностный слой обрабатываемой детали уходит небольшое количество тепла. Это снижает вероятность образования на обрабатываемой поверхности прижогов, микротрещин и других температурных дефектов, повышает качество и производительность обработки.

Список литературы

1. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. – 448 с.
3. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
4. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография / Ф. В. Новиков. – Д.: ЛИРА, 2018. – 400 с.
5. Баталин А. С. Тенденции развития высокоскоростной обработки / А. С. Баталин, В. М. Мануйленко // Физические и компьютерные технологии: труды 15-й Международной научно-технической конференции, 2–3 декабря 2009, г. Харьков. – Х.: ХНПК "ФЭД", 2009. – С. 137–145.
6. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.

References (transliterated)

1. Reznikov A. N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov / A. N. Reznikov. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. – 279 s.
2. Sizyy Yu. A. Dinamika i teplofizika shlifovaniya / Yu. A. Sizyy, D. V. Stalinskiy. – Kharkov: GP UkrNTTS "Energestal", 2016. – 448 p.
3. Yakimov A. V. Optimization of the grinding process / A. V. Yakimov. – Moscow: Mechanical Engineering, 1975. – 175 p.
4. Novikov F. V. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki: monografiya / F. V. Novikov. – Dnipropetrovsk : LIRA, 2018. – 400 p.
5. Batalin A. S. Tendentsii razvitiya vysokoskorostnoy obrabotki / A. S. Batalin, V. M. Manuylenko // Fizicheskiye i kom'pyuternyye tekhnologii: trudy 15 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 2–3 dekabrya 2009, Khar'kov. – Kharkov: KhNPK "FED", 2009. – P. 137–145.
6. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov / V. F. Bobrov. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. – 343 p.

Поступила (received) 03.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com